



李培艺,汪小昆,王延鑫,等. 基于 LiDAR 多维点云优化的茼蒿菊花采摘机器人自主导航方法研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(4):809-822.

LI Peiyi, WANG Xiaochan, WANG Yanxin, et al. Autonomous navigation system for chrysanthemum picking robot based on LiDAR multidimensional point cloud optimization[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 809-822.

基于 LiDAR 多维点云优化的茼蒿菊花 采摘机器人自主导航方法研究

李培艺,汪小昆*,王延鑫,武尧,李泽晟

(南京农业大学工学院,江苏 南京 210031)

摘要:[目的]针对田间作业环境复杂导致金丝皇菊采摘机器人行走不稳定、生产效率低的问题,本文设计了一种基于 LiDAR 多维点云优化的菊花采摘机器人自主导航系统,以实现机器人在农田中的精准作业与高效生产。[方法]通过履带式底盘搭载的 Velodyne 16 线激光雷达获取田间三维点云信息,并对其进行坐标校正和体素滤波预处理。提出了一种多维点云优化算法,可按照金丝皇菊植株生长特性获取不同坐标轴下的有效点云特征,生成左右两侧垄沟线;并采用改进纯跟踪控制算法对最小二乘法拟合得到导航基准线进行跟踪导航。[结果]通过对 Stanley 控制算法和改进纯跟踪控制算法进行仿真试验,改进纯跟踪算法表现出更高效的跟踪性能。利用金丝皇菊采摘机器人在南京市湖熟菊花园进行实地试验。试验结果表明,基于 LiDAR 多维点云优化的自主导航算法横向平均绝对误差为 0.047 4 m,标准差值为 0.030 6 m,位置偏差绝对值为 0.078 9 m,航向平均绝对误差为 2.177°,标准差值为 2.589°,横向平均绝对误差减小 67.13%,离散程度降低 48.34%。[结论]本文提出的基于 LiDAR 多维点云优化算法和改进纯跟踪算法可以有效提高导航精度,改善系统抗干扰性,导航效果较好,从而保证金丝皇菊采摘机器人的精准作业。

关键词: 金丝皇菊自主采摘;履带式机器人;激光雷达;田间自主导航;点云处理

中图分类号: S24; TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2024)04-0809-14

Autonomous navigation system for chrysanthemum picking robot based on LiDAR multidimensional point cloud optimization

LI Peiyi, WANG Xiaochan*, WANG Yanxin, WU Yao, LI Zesheng

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract:[Objectives] In response to the problems of unstable walking and low production efficiency of the golden chrysanthemum picking robot caused by the complex field operating environment, this paper designed an autonomous navigation system for the chrysanthemum picking robot based on LiDAR multi-dimensional point cloud optimization to achieve precise operation and efficient production of the robot in farmland. [Methods] The tracked chassis was equipped with a Velodyne 16-line LiDAR which was used to obtain 3D point cloud information in the field and coordinate correction and voxel filtering preprocessing were performed on it. A multidimensional point cloud optimization algorithm was proposed, which could adaptively obtain effective point cloud features under different coordinate axes on the characteristics of the golden chrysanthemum plant, and obtain ridge lines on both sides. The final navigation baseline was obtained using the least squares method to fit ridge lines, which was tracked by using an improved pure tracking control algorithm. [Results] Through simulation experiments on the Stanley control algorithm and the improved pure tracking control algorithm, the improved pure tracking algorithm showed more efficient tracking performance. A field experiment was conducted using the golden chrysanthemum harvesting robot at the Hushu Chrysanthemum Garden in Nanjing. The experimental results showed that the autonomous navigation algorithm based on LiDAR multi-dimensional point cloud optimization had a lateral average absolute error of 0.047 4 m, a standard deviation of 0.030 6 m, an extreme absolute position deviation of 0.078 9 m, a heading average absolute error of 2.177°, and a standard deviation of 2.589°, the lateral average absolute error was reduced by 67.13% and the degree of dispersion was reduced by 48.34%. [Conclusions] The LiDAR multi-dimensional point cloud optimization algorithm and improved pure tracking algorithm proposed in this article can effectively improve navigation accuracy, improve system anti-interference, and achieve good navigation results, thereby ensuring the precise operation of the golden chrysanthemum picking robot.

Keywords: automatic picking of golden chrysanthemum; tracked robot; LiDAR; autonomous navigation in the field; point cloud processing

收稿日期: 2023-08-27

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2021-11)

*通信作者: 汪小昆, 教授, 博导, 主要从事设施农业智能传感与检测技术研究, E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn。

在智慧农业领域,自主导航农业机器人受到越来越多的关注,自主导航不仅可以实现农业机器人在复杂的农田环境中自主行走,还能够协助完成农业机器人的精准作业^[1-2]。近年来,随着人们对保健养生需求的提高,金丝皇菊的消费量呈快速增长的趋势,但金丝皇菊的采摘难度大,对采摘机器人的作业精准性要求较高。因此,对金丝皇菊采摘机器人的自主导航展开研究具有现实价值。

目前,农业导航使用的系统包括全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)、激光雷达以及机器视觉导航系统等^[3-5]。周俊等^[6]设计了一种基于GNSS的智能水田旋耕平地机,将2个GNSS天线分别固定在旋耕平地机两端,以天线高程定位数据与俯仰角数据作为旋耕平地机高程与倾角信息,智能水田旋耕平地机平整度可达到3 cm左右。但GNSS容易受环境干扰、作物遮挡等导致信号丢失,难以实现导航定位。张京等^[7]结合自适应卡尔曼滤波算法构建了综合滤波模型,提出了一种以GNSS信号品质与航向角变化幅度信息为指导的INS/GNSS航向信息融合策略,在田间作业情况下具备抗环境扰动能力。INS利用相对定位的特点,不受环境干扰,但是其系统误差会随时间不断累积。Ma等^[8]提出的基于视觉线索和模糊控制的枸杞果园自主导航算法,具有良好的鲁棒性和实时性。Torres-Sospedra等^[9]使用带有自动光圈镜头的彩色CCD相机捕获真实环境,处理捕获的图像并区分图像每个元素的神经网络集合,并提取所需的路径进行导航,但相机受光线影响较大,无法在黑暗环境中工作。

为解决基于GNSS的农业机器人卫星信号弱且容易拥塞,以及机器视觉导航技术受光照强度、视角范围等条件限制等问题,胡炼等^[10]提出了基于激光感知的农业机器人定位方法,采用二维激光雷达和激光接收器设计基于激光感知的机器人定位系统,该系统能满足农业机器人在结构化环境中导航所需定位精度的要求。Jones等^[11]设计了猕猴桃园自主导航重型平台,在果园内对自主导航系统进行了评估,跟踪试验显示,仅使用多线激光雷达的导航误差绝对值在75 mm以内。Malavazi等^[12]使用PEARL方法提取二维点云,为提高作物检测的准确性,提出对离群点的处理、模型消除、新模型搜索和几何约束等方法,提高了机器人导航效果。刘伟洪等^[13]为克服二维激光扫描仪在果园导航中感知信息少、无法有效应对树冠茂密、树干被遮挡等复杂三维果园场景,提出一种基于3D激光雷达(laser radar, LiDAR)的果园行间导航方法,试验结果表明该系统可广泛用于标准果园与复杂三维果园机械的自主导航,具有可靠的稳定性。刘慧等^[14]提出一种基于激光雷达三维点云的果园行间高低频双源信息融合实时导航方法,该导航方法能够满足作业装备在果园行间自主导航作业的需求,为喷雾机器人在果园环境中的自主导航提供技术参考。王杰等^[15]针对温室颠簸不平、枝叶遮挡道路的复杂环境,提出基于相机与激光雷达数据融合的机器人行间导航方法,利用改进的U-Net模型实现图像道路区域的准确快速分割并将融合图像分割结果进行地面点云预分割,该方法满足温室机器人沿作物行自主导航行驶要求。

相比GNSS、INS和相机,激光雷达更适用于天气多变、光线不定的田间导航,但目前使用激光雷达作为导航传感器的大多为设施环境或结构化农田,而金丝皇菊生长在室外农田环境,植株较矮,花朵、枝叶杂乱无章,对导航路径提取造成严重的干扰。因此,本文设计了一种基于LiDAR多维点云优化的菊花采摘机器人自主导航系统,在多维环境点云中提取导航基准线,并对导航线进行路径跟踪控制,最后进行田间试验,验证导航系统的性能。

1 菊花采摘机器人结构及工作原理

1.1 机器人整体结构

金丝皇菊采摘机器人底盘结构如图1所示,由履带式底盘、控制系统与采摘机构组成。机器人主要性能参数:整体尺寸(长×宽×高)为1 600 mm×1 400 mm×1 600 mm,履带宽度10 cm,最大速度 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,额定功率3 kW,工作电压48 V,续航时间 $\geq 6 \text{ h}$ 。

1.2 工作原理

本文选用的激光雷达安装在机器人右侧履带上方位,距地面高度约0.25 m,倾角 15° 。激光雷达参数:测量范

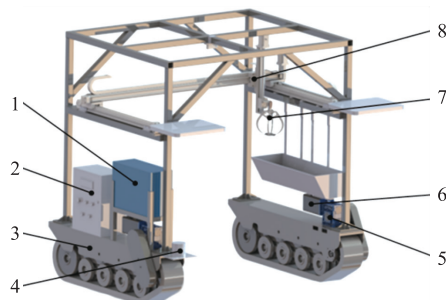


图1 金丝皇菊采摘机器人底盘结构

Fig. 1 Golden chrysanthemum picking robot chassis structure

1. 电池;2. 控制柜;3. 履带式底盘;4. 激光雷达;5. 减速器;6. 电机;7. 采摘末端;8. 直线模组结构。

1. Battery; 2. Control cabinet; 3. Tracked chassis; 4. LiDAR; 5. Reducer; 6. Motor; 7. Picking end; 8. Linear module structure.

围 1~100 m,测量精度±3 cm,垂直测量角度 30°,垂直方向角度分辨率 2°,水平方向测量角度 360°,水平方向角度分辨率 0.1~0.4°,测速 750 000 点·s⁻¹,帧率 5~20 Hz,波长 905 nm,质量 830 g。点云采集过程中激光雷达积分时间设置为 200 ms,跨垄式底盘以 0.3 m·s⁻¹沿金丝皇菊田垄进行采摘作业。

本研究于 2022 年 11 月在江苏省南京市湖熟菊花园(34°18'N, 108°1'E)采集采摘期金丝皇菊花田点云数据,金丝皇菊的种植垄长 16 m,上垄宽 47 cm,下垄宽 75 cm,垄高 35 cm,行距 30 cm,株距 47 cm,平均株高 80 cm。采集的环境点云数据如图 2 所示。

金丝皇菊采摘机器人系统工作原理如图 3 所示。垄间自主行走模式将激光雷达采集的三维花田点云数据由以太网口传输至 PC 端并提取垄行线,使用 Arduino 控制器作为下位机,将控制信号转化为电机速度指令,并将其通过串口传输给电机控制器实现机器人的垄间自主行走。

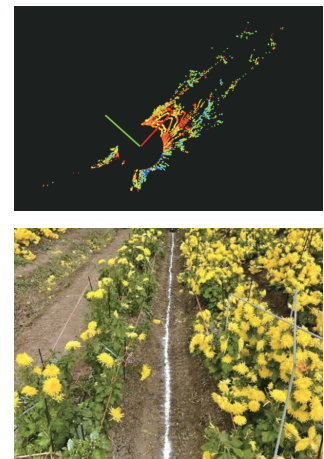


图 2 金丝皇菊田垄数据采集
Fig. 2 Golden chrysanthemum ridge data acquisition

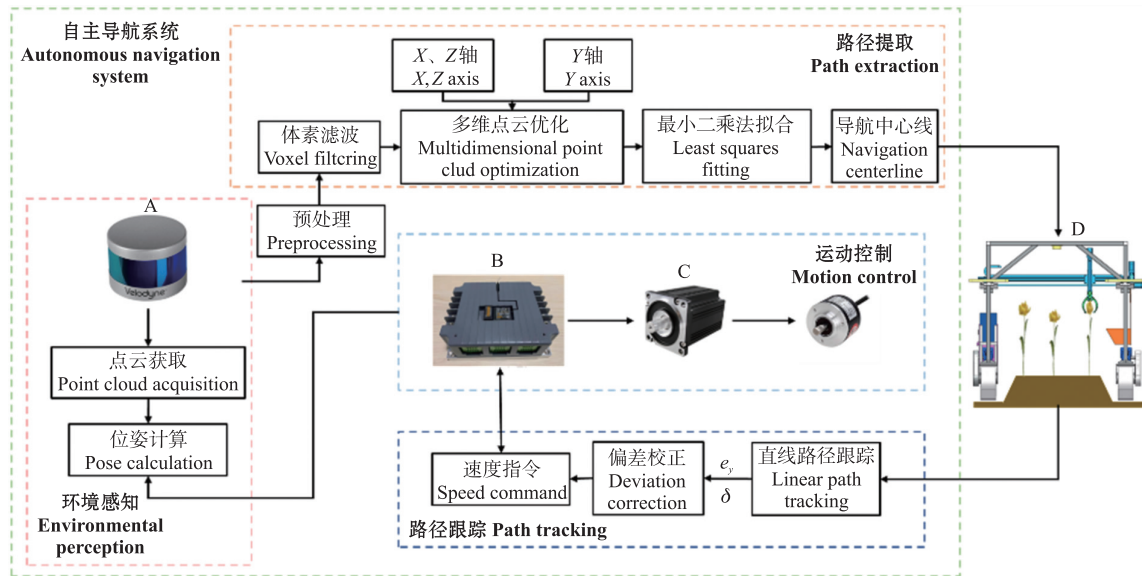


图 3 控制系统工作原理图

Fig. 3 Control system working principle diagram

A. LiDAR; B. 电机控制器 Motor controller; C. 电机 Motor; D. 采摘机器人 Picking robot.

导航控制系统为菊花采摘机器人的核心组成部分,本文选用具有 54 路数字输入输出、3 种供电方式的 Arduino Mega 2560 单片机作为控制核心。机器人垄间自主行走基于激光雷达导航系统设计,选用 Velodyne VLP-16 激光雷达,具备实时收发数据、360°全覆盖扫描测量、有效范围更广以及低功耗更高等优势^[16],能够高度灵活适应室外农田环境。机器人控制系统流程如图 4 所示,控制系统核心由单片机和上位机组成,完成对机器人底盘的控制。

2 基于 LiDAR 多维点云优化的菊花采摘机器人自主导航方法

金丝皇菊植株的生长特性较为复杂^[17-18],如枝叶茂密、花头过大过重易导致花茎折断等,对垄沟造成遮挡;而且花田三维点云分布不均匀,垄头点云密集,垄尾点云逐渐稀疏,土壤地面不平整且杂草多,都会导致采集的三维点云噪声较多,所以需去除噪声信息对垄行线与导航路径提取的干扰,进而提取垄间直线

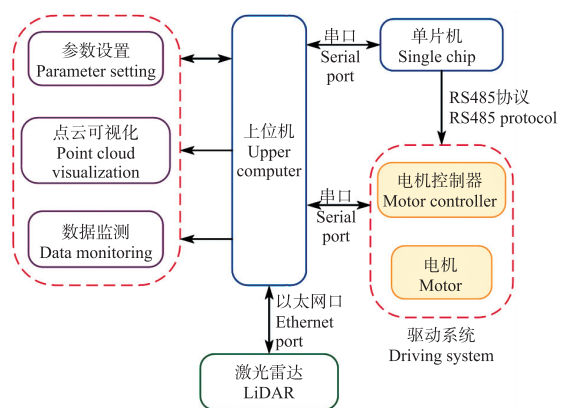


图 4 机器人控制系统

Fig. 4 Robot control system

路径。导航方法流程如图 5 所示。

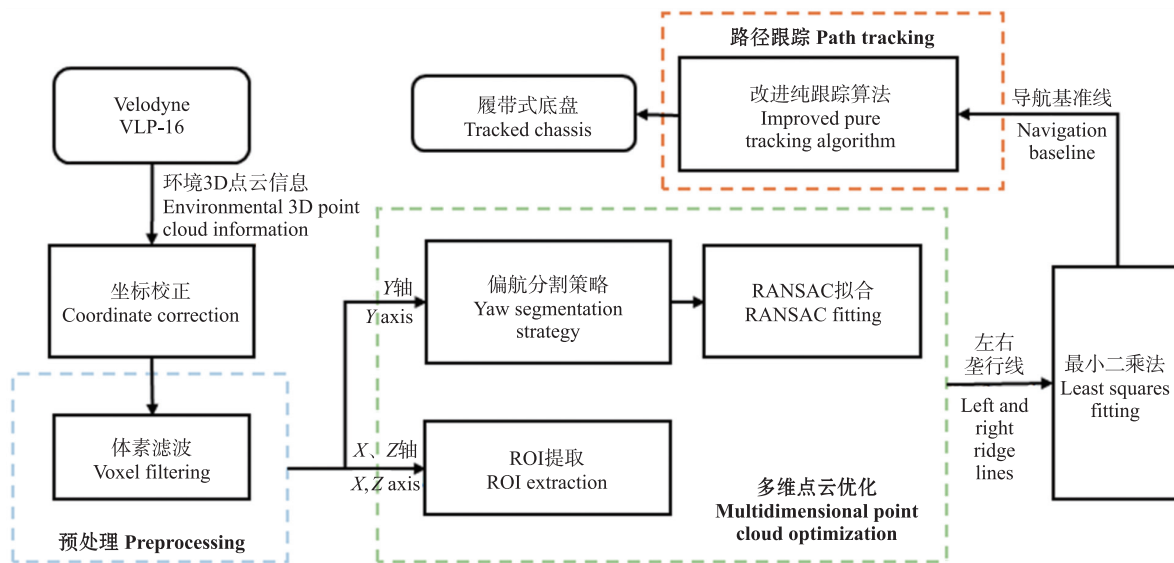


图 5 基于 LiDAR 多维点云优化的导航方法流程图

Fig. 5 Flow chart of navigation method based on LiDAR multidimensional point cloud optimization

2.1 基于 LiDAR 多维点云优化的垄线提取

2.1.1 位姿校正 Velodyne VLP-16 支持 16 通道,每秒可采集 30 万个三维点云数据,使用该激光雷达采集的花田点云数据量庞大,会导致后续计算量大,处理速度慢等问题。由于雷达安装存在 15°倾角,本文首先对原始环境点云进行坐标校正。变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 & \sin \theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_0 & 0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ_0 为雷达安装倾角。

采用体素滤波对原始点云数据进行预处理,减少计算量。体素滤波计算出一个刚好能够覆盖所有输入点云的三维体素栅格,根据设定的分辨率,将该三维体素栅格分割成不同的小体素,在每个体素内,用体素中所有点的质心来近似表示体素中的其他点^[19-20],这样该体素内所有点云就用一个质心点最终表示,达到向下采样目的同时不破坏点云本身几何结构的目的^[21]。

2.1.2 多维点云优化策略 三维环境点云信息经过体素滤波可以大大减少数据量,但由于金丝皇菊花田环境的复杂性(图 6),处理后的点云信息仍存在大量冗余数据。针对本文导航算法而言,环境噪声来源主要包括花头、枝叶和杂草,经分析,环境噪声呈现明显的坐标分布特性,扫描得到的 X 轴点云信息构成比较简单,主要为田垄;Y 轴点云信息包含田垄、呈散开状的枝叶以及因为花头过重造成折断的菊花等,较为复杂;Z 轴点云信息包含田垄、枝叶、花头,且其在 Z 轴坐标依次递增。基于上述情况,本文提出多维点云优化算法,即将预处理后的环境点云数据按坐标轴 X、Y、Z 三轴分别进行不同的算法处理。金丝皇菊花田示意图如图 7 所示。



图 6 金丝皇菊花田

Fig. 6 Golden chrysanthemum field

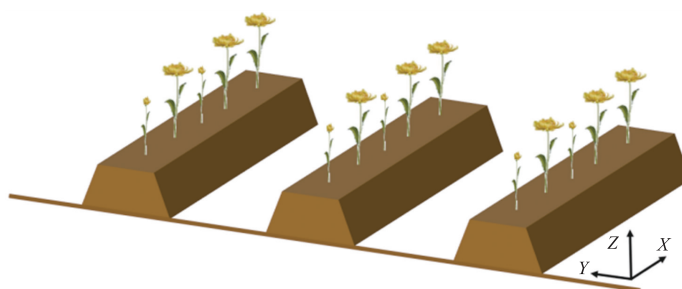


图 7 金丝皇菊花田示意图

Fig. 7 Golden chrysanthemum field diagram

X 、 Z 轴噪声来源相对简单,坐标特性明显,采用坐标兴趣区域(region of interest, ROI)提取算法^[22],即在三维环境点云中通过限制点云坐标信息勾勒出需要处理的区域,从而达到在 X 轴方向缩小扫描范围,并在 Z 轴方向删除田垄之上植被信息的目的。根据南京湖熟菊花园垄间数据及机器人相关参数,设置 X 轴 ROI 坐标范围 $(0, a)$,其中 a 为 2 个相邻采摘点间的距离,依据雷达安装位置以及垄沟高度,设置 Z 轴 ROI 坐标范围 $(-0.25, 0.1)$,从而达到去除植株点云数据的目的。处理前后的环境三维点云如图 8 所示。

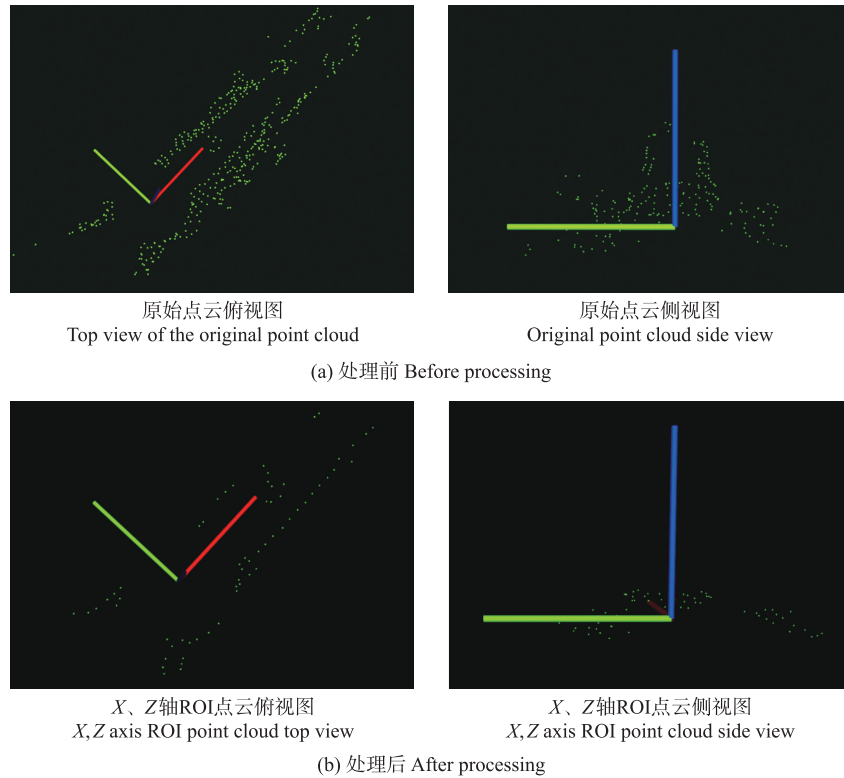


图 8 环境点云 ROI 处理对比图

Fig. 8 Comparison of ROI processing for environmental point clouds

Y 轴噪声来源较复杂,包括杂草、歪倒的枝叶和下垂的花头等,且这些环境噪声无明显的随坐标变化规律。基于以上情况,本文设计以下提取策略:在杂乱的点云信息中将 X 轴左右两侧数据进行分割,在两侧数据中筛选提取出单侧垄行线,将两侧垄行线拟合得到导航基准线。进行左右垄线分割时,考虑到机器人可能存在偏航角(图 9),直接根据扫描点云中心轴分割左右垄线会存在误差,本文提出一种偏航分割策略^[23]。具体步骤:

1) 根据激光雷达的 Y 轴分割当前 ROI,获得左垄线粗略点云集合 $PtCil$ 和右垄线粗略点云集合 $PtCir$ 。

2) 假设机器人当前偏航角为 α ,遍历右垄线粗略点云集合 $PtCir$,角度大于 α 的点云属于精确右侧垄线点云 $P(r)$,剔除集合其余点云;假设机器人当前偏航角为 $-\alpha$,遍历左垄线粗略点云集合 $PtCil$,角度小于 $-\alpha$ 的点云属于精准左侧垄线点云 $P(l)$,剔除集合其余点云。

基于兴趣区域提取垄行线,选用最小二乘法和随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)方法分别提取左右两侧垄行线,并进行田间试验对比。最小二乘法是拟合直线最常用的方法,它通过最小化所有点云数据误差的平方并寻找所有数据的最佳函数匹配^[24]。RANSAC 方法也可以对垄行线进行提取。如图 10 所示,RANSAC 算法拟合垄行线步骤如下^[25](以拟合左侧垄线为例):

1) 在提取出的左侧垄线点云数据集 $P(l)$ 中随机采样,选取 2 个点假设为局内点,建立如下直线模型:

$$L_1: y = k_1x + b_1 \quad (2)$$

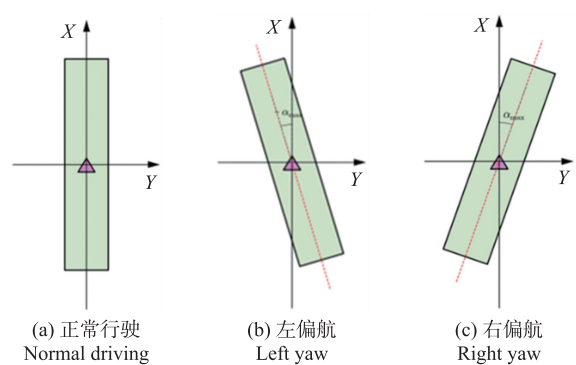


图 9 机器人偏航示意图

Fig. 9 Schematic diagram of robot yaw

2) 设定距离阈值 D , 迭代阈值 T 。

3) 设定数组 $S(i)$ 用来存放局内点, 遍历点云集 $P(l)$, 检验点云集 $P(l)$ 中的其他点是否满足该直线模型 L_1 , 即 $P(l)$ 中其他点到直线 L_1 的距离 $d(l)$ 是否小于距离阈值 D , 如果满足, 记为该模型的局内点存放于数组 $S(i)$, 反之记为局外点。

4) 重复迭代多次, 若本次迭代直线模型内点数大于上次迭代直线模型内点数, 则本次迭代直线模型为当前最优单侧垄行线方程。

5) 直到迭代次数 t 达到迭代阈值 T , 此时的最优单侧垄行线方程即本文所求的最优单侧垄行线方程。

迭代终止条件阈值 k 如公式(3)所示:

$$k = \frac{\log(1-P)}{\log(1-W^n)} \quad (3)$$

式中: W^n 表示随机抽取的 n 个点都是局内点的概率; $1-W^n$ 表示至少存在 1 个局外点的概率; $(1-W^n)^k$ 表示迭代 k 次都至少存在 1 个局外点的概率。当 k 足够大时, 概率会变得很小, 模型可信度更高, 迭代 k 次至少可以获得 1 组正确模型参数的概率 $P=1-(1-W^n)^k$ 。

基于此对单侧田垄点云数据拟合, 得到单侧田垄行线, 同理得到另一侧田垄行线。拟合效果如图 11 所示。

得到两侧垄行线后, 为减少误差, 通过最小二乘法拟合左、右垄行线, 得到最终的中心导航路径 $L: y=ax+b$ 。推导可得参数 a 、 b 的最佳估计值:

$$\hat{a} = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

$$\hat{b} = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (5)$$

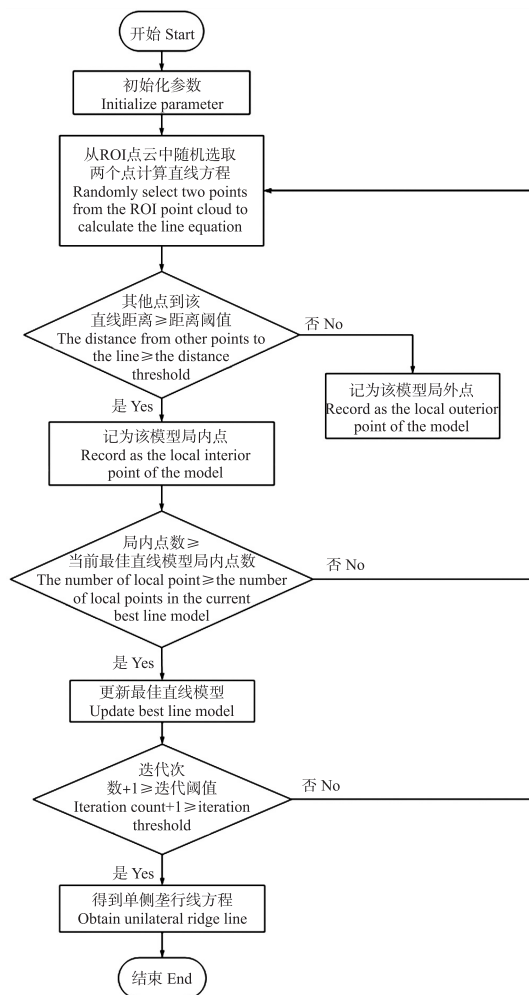


图 10 随机采样一致性 (RANSAC) 拟合垄行线流程图
Fig. 10 Random sample consensus (RANSAC) fitting ridge line flowchart

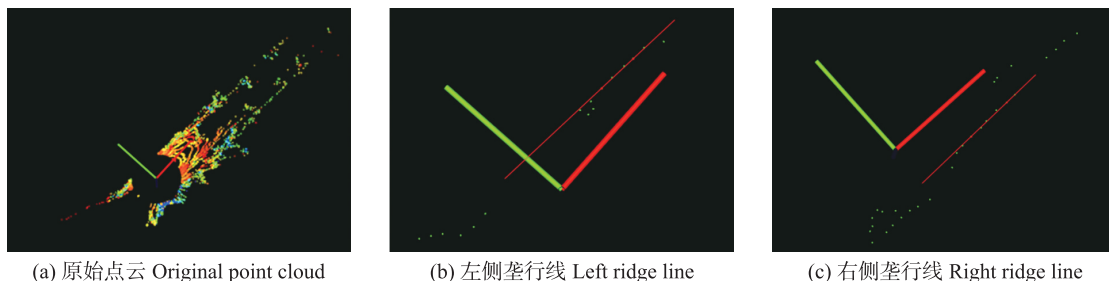


图 11 RANSAC 拟合效果图

Fig. 11 RANSAC fitting effect diagram

2.2 基于两轮差速模型的导航控制算法

选择恰当的控制算法对于履带式底盘机器人完成采摘点间的直线路径跟踪至关重要。控制方法可以根据是否建立运动模型划分为无运动模型控制算法和有运动模型控制算法; 无模型控制算法包括 PID 控制、模糊控制等; 有模型控制算法包括基于运动学模型的控制方法以及基于车辆动力学模型的控制方

法^[26]。针对金丝皇菊采摘机器人履带式底盘特点及运动要求,选用基于运动学模型的前轮反馈控制和改进纯跟踪控制进行改进。

2.2.1 Stanley 控制 前轮反馈控制又称 Stanley 控制,通过履带中心点的路径跟踪偏差量对车体转向控制量进行计算^[27],如图 12 所示。履带中心点 P 即机器人底盘中心, P_1 为参考轨迹最近点, P_2 为设定轨迹在距离履带式底盘 $d(t)$ 处与 P_1 点切线的相交点。履带转角控制变量 δ 由 2 部分组成:航向误差造成的转角 δ_φ ,即当前机器人底盘方向与参考轨迹最近点的切线方向的夹角;横向误差造成的转角 δ_y ,即履带中心点到参考轨迹最近点的横向距离^[28]。 δ_φ 和 δ_y 为算法模型中提出的变量参数,可由图 12 中参数推导,对应图中的 θ_φ 和 θ_y 。 $\delta(t)$ 为履带转角随时间变化的函数关系:

$$\delta(t) = \theta_\varphi(t) + \arctan \frac{ke_y(t)}{v(t)} \quad (6)$$

式中: θ_φ 为最近轨迹点切线与履带方向之间的夹角; e_y 为 P 与 P_1 点间距离,即横向误差; v 为当前行驶速度; k 为常数系数。

横向误差 δ_y 的变化率为:

$$\dot{e}_y = \frac{-kve_y}{\sqrt{v^2 + (ke_y)^2}} = \frac{-ke_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{ke_y}{v}\right)^2}} \quad (7)$$

当横向误差(e_y)很小时, $\left(\frac{ke_y}{v}\right)^2 \rightarrow 0$,代入上式(7)可得:

$$\dot{e}_y \approx -ke_y \quad (8)$$

对式(8)积分得:

$$e_y(t) = e_y(0) \times e^{-kt} \quad (9)$$

故而横向误差 e_y 收敛于 $e_y(0)$,收敛速度取决于增益参数 k 。

2.2.2 基于两轮差速运动模型的改进纯跟踪控制 由于金丝皇菊采摘机器人的工作环境为相对复杂的大田环境,且土壤地面松软难行,因此选用履带式底盘,依据两轮差速运动模型^[29]对履带式底盘进行运动学分析。机器人有 3 种运动状态(图 13),其中 v_l 为左履带速度, v_r 为右履带速度。当 $v_l < v_r$ 或 $v_l > v_r$ 时,机器人运动轨迹为圆弧;当 $v_l = v_r$ 时,机器人运动轨迹为直线;当 $v_l = -v_r$ 时,机器人以左右履带中心点为圆心进行原地旋转运动。

综合上述 Stanley 跟踪算法运动模型的选取,本文基于两轮差速运动模型对纯跟踪算法(pure pursuit,

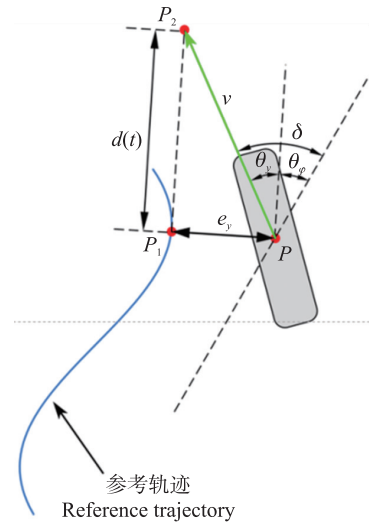


图 12 Stanley 控制运动模型

Fig. 12 Stanley control motion model for robots

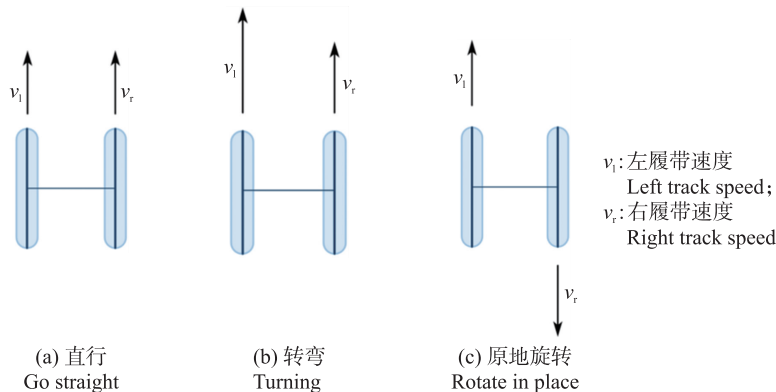


图 13 机器人 3 种运动状态

Fig. 13 Three motion states of robots

pp)^[30]进行改进。首先建立机器人运动学模型,如图14所示,机器人长为 D ,左右履带间距为 L ,定义左右履带中心分别为 W_l 和 W_r ,左右履带在惯性坐标系下的线速度分别为 v_l 和 v_r ,设定机器人的中心点为 C ,坐标为 (x,y) ,偏航角为 δ 。

相邻两时刻履带机器人的运动模型如图15所示, XOY 为全局坐标系。其中 A 为机器人当前位置, B 为预瞄点, δ 为转向角, R 为瞬时转弯半径,机器人当前位置 A 与预瞄点 B 之间的距离 l_d 称之为预瞄距离, e_y 为机器人当前姿态和预瞄点在横向上的误差。

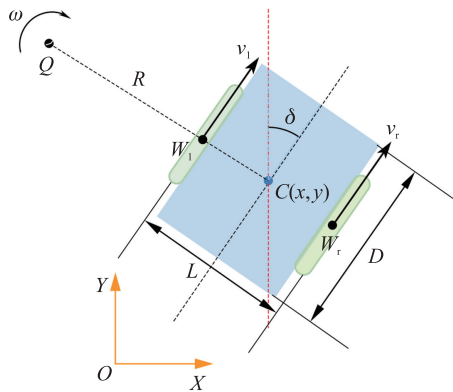


图14 机器人运动模型
Fig. 14 Robot motion model

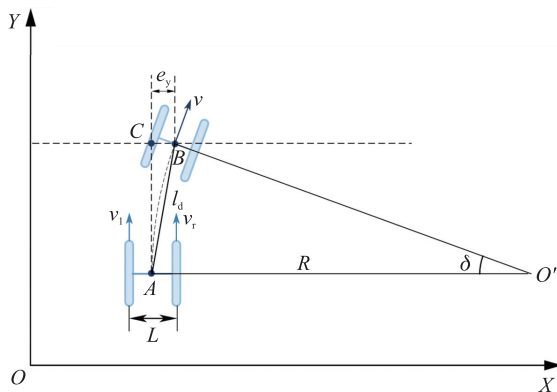


图15 相邻两时刻机器人运动模型
Fig. 15 Two adjacent moment robot motion model

金丝皇菊采摘机器人瞬时速度 v 可以表示为:

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} \tag{10}$$

瞬时角速度 ω 可以表示为:

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{L} \tag{11}$$

假设转弯半径为 R ,转向时转向瞬心为 Q ,结合式(10)和式(11)可得机器人转动半径公式:

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{L(v_r + v_l)}{2(v_r - v_l)} \tag{12}$$

基于以上运动分析,在履带与地面接触运动为纯滚动的情况下,机器人的运动学模型可以表示为以下方程:

$$\begin{cases} \dot{X}_c = \frac{1}{2}(v_r + v_l) \sin \delta \\ \dot{Y}_c = \frac{1}{2}(v_r + v_l) \cos \delta \end{cases} \tag{13}$$

整理得机器人位姿向量 \dot{P} :

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{X}_c \\ \dot{Y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & 0 \\ \cos \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \tag{14}$$

其次,基于该运动学模型推导转向角,在三角形 $AO'B$ 中可由正弦定理关系推得:

$$\frac{l_d}{\sin \delta} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} \tag{15}$$

化简上式可得:

$$\delta = 2 \arcsin \frac{l_d}{2R} \tag{16}$$

结合式(15)和(16),得到:

$$\delta(t) = 2 \arcsin \frac{l_d(v_r(t) - v_l(t))}{L(v_r(t) + v_l(t))} \quad (17)$$

在三角形 ABC 中可由正弦定理关系推导:

$$e_y = l_d \sin \frac{\delta}{2} \quad (18)$$

结合式(17)和(18),可得:

$$e_y(t) = \frac{l_d^2}{L} \cdot \frac{v_r(t) - v_l(t)}{v_r(t) + v_l(t)} \quad (19)$$

即纯跟踪控制的跟踪效果由 l_d 决定,一些文献中定义 l_d 为关于速度的一次多项式:

$$l_d = k_v v + l_{d0} \quad (20)$$

式中: v 为当前车速; k_v 为可调节参数; l_{d0} 为预设前视距离。由于目标轨迹函数方程求解复杂,可调节参数 k_v 难以确定,对已有 l_d ^[31] 结合本文模型进行改进。根据履带式底盘机器人采用两轮差速方式在行间直线行走特点,以及在实际应用中履带相对车轮其履带长度不可忽略的问题。定义 l_d 如下:

$$l_d = Av^2 + B \quad (21)$$

式中:常数 $A = \frac{1}{2a_{\max}}$, a_{\max} 为最大制动加速度,即 Av^2 为机器人最短制动距离; B 为机器人履带长度; v 为当前车速。

2.2.3 路径跟踪算法仿真 基于 matlab 搭建 Stanley 算法仿真模型,设置直线路径与曲线路径进行跟踪仿真。仿真初始条件:偏航角 30° ,初始位置坐标 $(0,0.5)$,机器人行驶速度 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两履带中心距 1.5 m 。

直线参考路径与跟踪路径对比效果如图 16 所示,初始位置坐标为 $(0,0.5)$,蓝色路径为参考路径,红色路径为跟踪路径,两者对比可以看出机器人在 20 s 左右跟踪到参考路径并收敛于参考路径。

直线跟踪过程中横向误差值变化如图 17 所示,横向误差在 20 s 达到稳态,由最初的 0.5 m 逐渐稳定在 0 m 。跟踪过程中航向偏差值变化如图 18 所示,航向偏差同样在 20 s 左右达到稳态,由最初的 30° 逐渐稳定在 31.4° 。

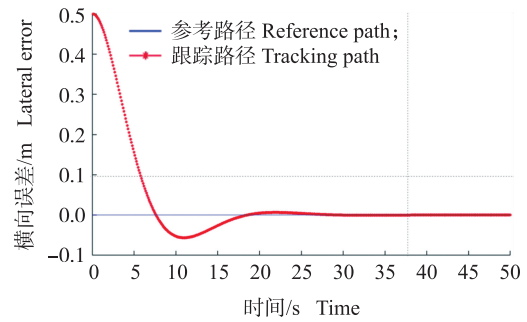


图 16 Stanley 算法路径跟踪效果

Fig. 16 Stanley algorithm's path tracking performance

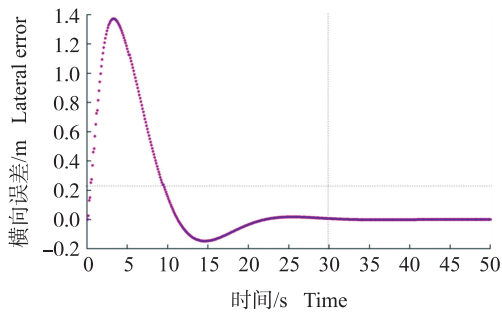


图 17 Stanley 算法横向误差变化图

Fig. 17 Stanley algorithm lateral error variation chart

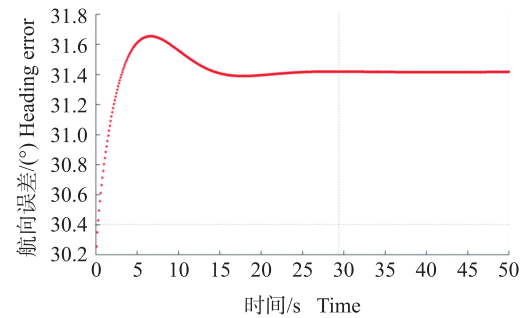


图 18 Stanley 算法航向误差变化图

Fig. 18 Stanley algorithm heading error variation chart

基于 matlab 搭建改进纯跟踪算法模型,仿真试验中参考路径与跟踪路径对比效果如图 19 所示,初始位置坐标为 $(0,0.5)$,蓝色路径为参考路径,红色路径为跟踪路径,两者对比可以看出机器人在 6 s 左右跟踪到参考路径并收敛于参考路径。跟踪过程中航向偏差值变化如图 20 所示,航向偏差在 6 s 左右达到稳态,由最初的 30° 逐渐稳定在 31.4° 。

对比 Stanley 路径跟踪控制算法和改进纯跟踪路径跟踪控制算法仿真结果可知,改进纯跟踪路径跟踪控制算法控制速度较快、较为精准。

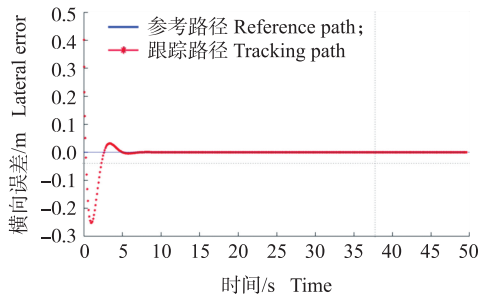


图 19 改进纯跟踪算法路径跟踪效果

Fig. 19 Improved pure pursuit algorithm path tracking effect

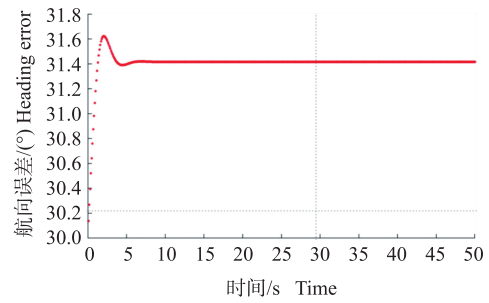


图 20 改进纯跟踪算法航向误差变化图

Fig. 20 Improved pure pursuit algorithm heading error variation chart

3 田间试验

3.1 采摘需求

为配合金丝皇菊采摘要求,设计导航策略如下:金丝皇菊茎长 16 m,采摘所用深度相机设置分辨率为 640×480,安装高度距水平面 160 cm,视野范围 140 cm×150 cm。深度相机采集图像如图 21 所示。由于相机定点采集图像的视野存在边缘菊花不完整等情况,导致采收遗漏,为确保成熟金丝皇菊的完全采收,设计相邻采摘点采摘范围重合 4%,即相邻采摘点间距 1.44 m,如图 22 所示。



图 21 深度相机采集图像

Fig. 21 Depth camera capturing images

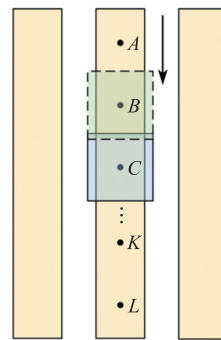


图 22 导航策略示意图

Fig. 22 Navigation strategy diagram

如图 23 所示,当采摘机器人在第 n 个采摘点完成全部采摘任务后,向电机发出前进指令,向前进方向规划直线路径并进行跟踪控制,直至底盘运动到第 $n+1$ 个采摘点后停止运动,并向采摘机器人发送采摘指令,进行第 $n+1$ 个采摘点的采摘作业,直至采摘任务完成,循环往复。

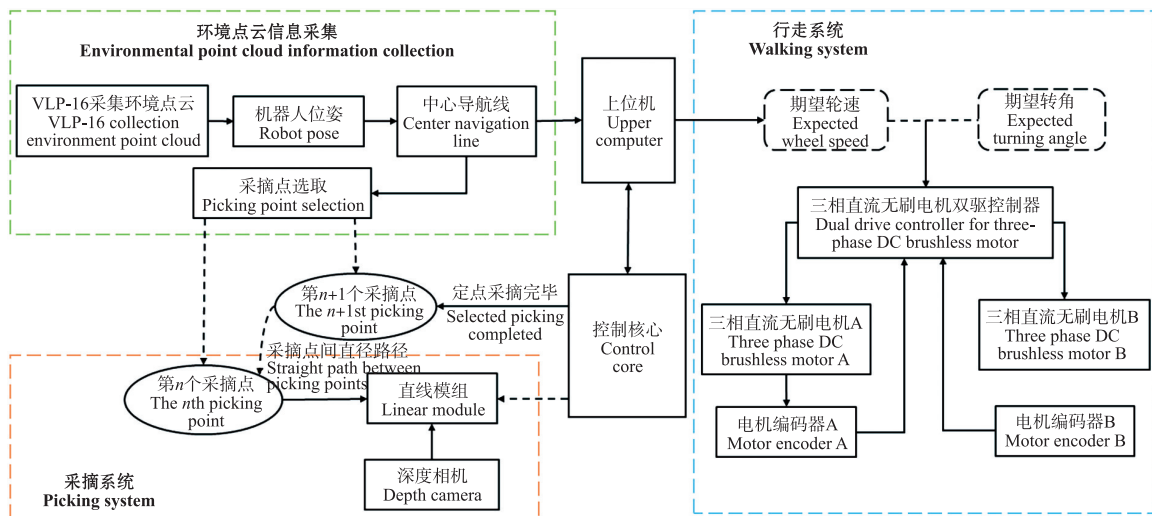


图 23 自主行走采摘流程图

Fig. 23 Flowchart of autonomous walking picking

3.2 多维点云优化试验

为研究基于 LiDAR 多维点云优化的导航系统性能,在南京市江宁区湖熟菊花园进行导航试验,湖熟菊花园金丝皇菊花田环境参数:垄行长度 16 m,上垄宽 0.47 m,下垄宽 0.75 m,垄沟宽 0.35 m,垄高 0.35 m,行距 0.3 m,株距 0.47 m。对金丝皇菊花田点云进行体素滤波处理,花田三维点云经不同分辨率的体素滤波后的可视化结果如图 24 所示。

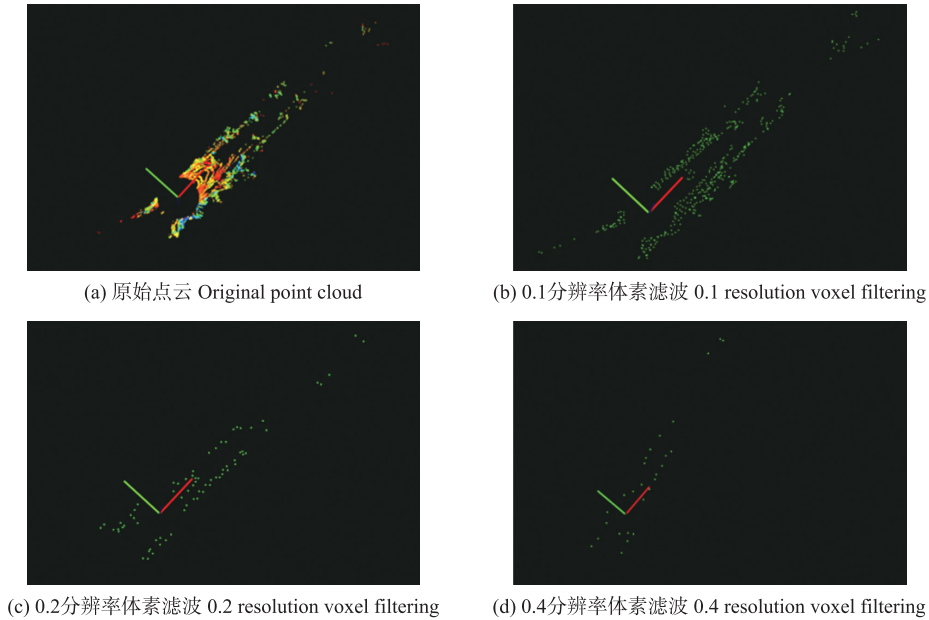


图 24 不同分辨率体素滤波结果对比

Fig. 24 Comparison of voxel filtering results with different resolutions

为保证减少计算量的同时最大程度保留花田环境点云结构特征,设置 0.1 分辨率。机器人在静止状态和 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 行走速度下分别采集花田环境三维点云数据,选取 30 帧点云进行计算,处理前静止和运动的平均环境点云数为 14 003 和 13 875;经初滤波后,静止和运动两种状态下采集到的平均环境点云数分别为 1 588 和 1 436,滤波的平均处理时间分别约为 $8.936\times 10^{-3} \text{ s}$ 和 $8.846\times 10^{-3} \text{ s}$,处理速度较快,且计算量可减少 86%。

对预处理后的点云数据进行 ROI 提取以及左右垄行分割处理,并基于上述处理提取垄行线。通过对比相同时刻最小二乘法和 RANSAC 提取垄行线效果,对 2 种算法进行量化分析得到最佳提取算法,如图 25 所示。由图 25-a、b 可得,在环境噪声较小或不存在噪声的情况下,最小二乘法和 RANSAC 提取垄行线方

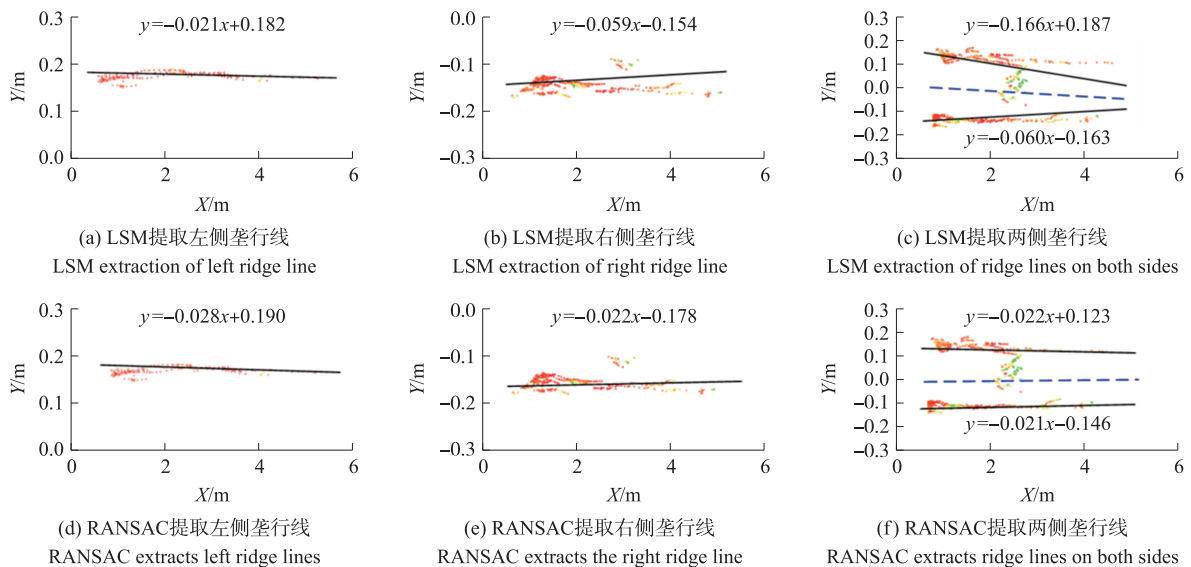


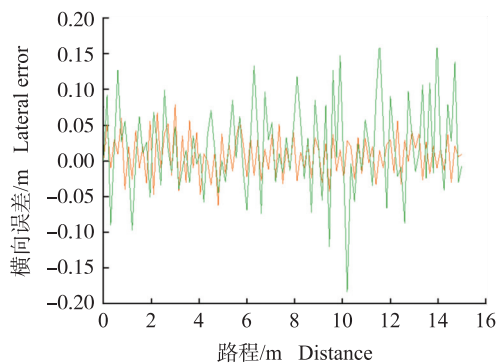
图 25 最小二乘法和随机采样一致性两种算法提取垄行线对比结果

Fig. 25 Comparison results of extracting ridge lines using LSM and RANSAC algorithms

程斜率分别为 -0.021 和 -0.028 ,提取效果十分接近;由图25-c、d可知,在存在环境噪声的情况下,最小二乘法和RANSAC提取垄行线方程斜率分别为 0.059 和 0.022 ,提取效果存在明显区别;由图25-e、f可得,最小二乘法和RANSAC提取左侧垄行线方程斜率分别为 -0.166 和 -0.022 ,右侧垄行线方程斜率为 0.060 和 0.021 ,并依据左右侧垄行线方程拟合得到最终导航中心线方程斜率分别为 0.062 和 0.011 ,提取效果存在明显差异。以上结果表明RANSAC提取直线路径抗干扰性较好。

3.3 机器人路径跟踪算法试验

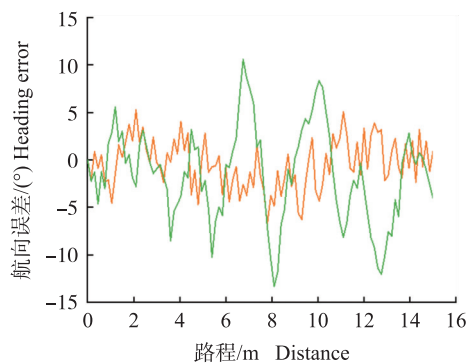
为验证基于LiDAR多维点云优化导航算法的有效性,分别在Stanley控制算法和改进纯跟踪算法下,设置金丝皇菊采摘机器人沿垄行线行驶速度为 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,无初始偏航角,无初始横向误差,每隔 0.15 m 取轨迹点,取该轨迹点到导航中心线距离的绝对值为横向误差,取相邻两轨迹点连线与参考系 X 轴夹角为航向误差进行试验。试验对比结果如图26、27所示。



— 改进纯跟踪算法 Improved pure tracking algorithm;
— Stanley控制算法 Stanley control algorithm

图26 横向误差对比

Fig. 26 Comparison of horizontal error



— 改进纯跟踪算法 Improved pure tracking algorithm;
— Stanley控制算法 Stanley control algorithm

图27 航向误差对比

Fig. 27 Comparison of heading error

由图26和27可知,Stanley控制算法试验中,机器人轨迹与导航中心线的横向平均绝对误差为 0.0706 m ,标准差值为 0.0633 m ,位置偏差绝对值极值为 0.183 m ,航向平均绝对误差为 4.057° ,标准差值为 4.951° ;改进纯跟踪算法试验中,横向平均绝对误差为 0.0474 m ,标准差值为 0.0306 m ,位置偏差绝对值极值为 0.0789 m ,航向平均绝对误差为 2.177° ,标准差值为 2.589° 。相比Stanley控制算法,改进纯跟踪算法横向平均绝对误差提高 67.13% ,离散程度降低 48.34% 。根据机器人参数和垄沟参数可知,机器人在垄间行驶过程中允许的最大横向误差为 5 cm 左右。根据试验结果可知,选用Stanley算法,机器人在行驶过程中很可能会存在碾压相邻垄的情况,而改进纯跟踪算法控制下的机器人在行驶过程中可以满足金丝皇菊田垄作业环境,因此改进纯跟踪算法跟踪效果较好。

4 结论

1)使用LiDAR对多维农田环境点云进行优化,并基于LSM算法提取了导航基准线。通过对采集到的环境点云数据进行体素滤波预处理,以减少计算量、加快处理速度;根据环境噪声点云的坐标分布特性,分别对 X 、 Z 轴信息进行ROI提取, Y 轴信息进行RANSAC拟合,分别得到两侧垄行线方程;并采用LSM算法对两垄行线进行计算,求解得到本文的导航基准线。

2)根据机器人行走控制要求,提出了基于两轮差速模型的改进纯跟踪算法。依据机器人履带式底盘特点和自主行走要求,选择Stanley算法和PP算法进行研究与改进;依据Stanley算法建立本文机器人运动学模型,并以PP算法为基础进行推导改进,并对预瞄距离结合本文参数重新定义,提出基于两轮差速模型的改进纯跟踪算法;并对提出的改进跟踪算法进行仿真试验,验证其有效性。

3)进行了金丝皇菊采摘机器人导航系统试验验证,在点云数据预处理后,垄线提取计算量减少 86% ;采用改进PP算法的导航跟踪系统,其位置偏差绝对值极值为 0.0789 m ,横向平均绝对误差为 0.0474 m ,标准差值为 0.0306 m ,能够满足机器人正常作业;采用改进纯跟踪算法的导航系统横向平均绝对误差降低 67.13% ,离散程度降低 48.34% ,导航精度满足作业要求。

参考文献 References:

- [1] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(4):1-18.
Zhang M, Ji Y H, Li S C, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18 (in Chinese with English abstract).
- [2] 谭晨佼,李轶林,王东飞,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农机化研究,2020,42(5):7-14,32.
Tan C J, Li Y L, Wang D F, et al. Review on automatic navigation technologies of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 7-14, 32 (in Chinese with English abstract).
- [3] 钟银,薛梦琦,袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报,2021,37(9):40-46.
Zhong Y, Xue M Q, Yuan H L. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 40-46 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王梦龙,逯亮清,于保宏. 组合导航在精准农业领域的应用与展望[J]. 农业工程技术,2019,39(36):46-51.
Wang M L, Lu L Q, Yu B H. Application and prospect of integrated navigation in precision agriculture[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019, 39(36): 46-51 (in Chinese).
- [5] 王东,范叶满,薛金儒,等. 基于 GNSS 与视觉融合的山地果园无人机航迹控制[J]. 农业机械学报,2019,50(4):20-28.
Wang D, Fan Y M, Xue J R, et al. Flight path control of UAV in mountain orchards based on fusion of GNSS and machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 20-28 (in Chinese with English abstract).
- [6] 周俊,许建康,王耀羲,等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4):38-43.
Zhou J, Xu J K, Wang Y X, et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 38-43 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张京,陈度,王书茂,等. 农机 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊1):1-7.
Zhang J, Chen D, Wang S M, et al. Research of INS/GNSS heading information fusion method for agricultural machinery automatic navigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Suppl 1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [8] Ma Y E, Zhang W Q, Qureshi W S, et al. Autonomous navigation for a wolfberry picking robot using visual cues and fuzzy control[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(1): 15-26.
- [9] Torres-Sospedra J, Nebot P. A new approach to visual-based sensory system for navigation into orange groves[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4086-4103.
- [10] 胡炼,王志敏,汪沛,等. 基于激光感知的农业机器人定位系统[J]. 农业工程学报,2023,39(5):1-7.
Hu L, Wang Z M, Wang P, et al. Agricultural robot positioning system based on laser sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(5): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [11] Jones M H, Bell J, Dredge D, et al. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 129-146.
- [12] Malavazi F B P, Guyonneau R, Fasquel J B, et al. LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 71-79.
- [13] 刘伟洪,何雄奎,刘亚佳,等. 果园行间 3D LiDAR 导航方法[J]. 农业工程学报,2021,37(9):165-174.
Liu W H, He X K, Liu Y J, et al. Navigation method between rows for orchard based on 3D LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 165-174 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘慧,段小鹏,沈跃. 果园移动机器人激光雷达双源信息融合实时导航方法[J]. 农业机械学报,2023,54(8):249-258.
Liu H, Duan Y P, Shen Y. Real-time navigation method of orchard mobile robot based on laser radar dual source information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 249-258 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王杰,陈正伟,徐照胜,等. 基于相机与激光雷达融合的温室机器人行间导航方法[J]. 农业机械学报,2023,54(3):32-40.
Wang J, Chen Z W, Xu Z S, et al. Inter-rows navigation method of greenhouse robot based on fusion of camera and LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 32-40 (in Chinese with English abstract).
- [16] 史风栋,刘文皓,汪鑫,等. 室内激光雷达导航系统设计[J]. 红外与激光工程,2015,44(12):3570-3575.
Shi F D, Liu W H, Wang X, et al. Design of indoor laser radar navigation system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3570-3575 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张玲. 高寒阴湿地区金丝皇菊种植技术及发展现状[J]. 南方农机,2020,51(10):60.
Zhang L. Planting techniques and development status of golden chrysanthemum in cold and humid areas[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 60 (in Chinese).
- [18] 文艺. 浅谈金丝皇菊花种植栽培技术[J]. 农业开发与装备,2022(11):218-219.
Wen Y. Discussion on planting and cultivation techniques of *Chrysanthemum morifolium*[J]. Agricultural Development & Equipments, 2022 (11): 218-219 (in Chinese).
- [19] 蒋通,邹进贵. 基于区域生长的体素滤波点云去噪算法[J]. 测绘地理信息,2021,46(2):63-66.
Jiang T, Zou J G. Point cloud denoising algorithm of voxel filtering based on region growing[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(2): 63-66

- (in Chinese with English abstract).
- [20] 姚杰. 机载 LiDAR 点云滤波及分类研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2022.
Yao J. Research on airborne LiDAR point cloud filtering and classification[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2022 (in Chinese with English abstract).
- [21] 邢影,宋涛,赵延,等. 3D-SIFT 特征提取与体素滤波结合的点云精简算法[J]. 激光杂志,2023,44(3):163-169.
Xing Y,Song T,Zhao Y,et al. Point cloud reduction algorithm of 3D-SIFT feature point extraction and voxel filtering[J]. Laser Journal,2023, 44(3):163-169(in Chinese with English abstract).
- [22] 张弛,沈明霞,刘龙申,等. 基于机器视觉的新生仔猪目标识别方法研究与实现[J]. 南京农业大学学报,2017,40(1):169-175. DOI: 10.7685/jnau.201602017.
Zhang C,Shen M X,Liu L S,et al. Newborn piglets recognition method based on machine vision[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017,40(1):169-175(in Chinese with English abstract).
- [23] 于斌,张钰钦,王羽尘,等. 基于车载激光点云的道路几何信息自动化提取[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(2):88-99.
Yu B,Zhang Y Q,Wang Y C,et al. Automated extraction of road geometry information using mobile LiDAR point cloud[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2023,51(2):88-99(in Chinese with English abstract).
- [24] 田垅,刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合[J]. 计算机科学,2012,39(增刊1):482-484.
Tian L,Liu Z T. Least-squares method piecewise linear fitting[J]. Computer Science,2012,39(Suppl 1):482-484(in Chinese with English abstract).
- [25] 傅灯斌,江茜,齐龙,等. 基于区域生长顺序聚类-RANSAC 的水稻苗带中心线检测[J]. 农业工程学报,2023,39(7):47-57.
Fu D B,Jiang Q,Qi L,et al. Detection of the centerline of rice seedling belts based on region growth sequential clustering-RANSAC[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(7):47-57(in Chinese with English abstract).
- [26] 周明宽,夏俊芳,杨方,等. 基于 Hough 矩阵和 RANSAC 算法的果园视觉导航平台系统设计与试验[J]. 农业工程技术,2022,42(21):101.
Zhou M K,Xia J F,Yang F,et al. Design and experiment of visual navigated UGV for orchard based on Hough matrix and RANSAC[J]. Agricultural Engineering Technology,2022,42(21):101(in Chinese).
- [27] 史扬杰,程馨慧,奚小波,等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(15):1-15.
Shi Y J,Cheng X H,Xi X B,et al. Agricultural machinery navigation path tracking control method research progress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(15):1-15(in Chinese with English abstract).
- [28] 何杰,满忠贤,胡炼,等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(1):9-17.
He J,Man Z X,Hu L,et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(1):9-17(in Chinese with English abstract).
- [29] 崔冰波,孙宇,吉峰,等. 基于模糊 Stanley 模型的农机全田块路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报,2022,53(12):43-48,88.
Cui B B,Sun Y, Ji F,et al. Study on whole field path tracking of agricultural machinery based on fuzzy Stanley model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):43-48,88(in Chinese with English abstract).
- [30] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等. 基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报,2022,53(11):22-30,99.
Chi R J,Xiong Z X,Jiang L T,et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):22-30,99(in Chinese with English abstract).
- [31] Duan J M, Yang C, Shi H. Path tracking based on pure pursuit algorithm for intelligent vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2018,19(2):613-626.

责任编辑:沈波